

УДК 621.036.7

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147526

**Эффективность воздухонагревателя теплоутилизационной системы при различных теплофизических параметрах и режимах работы котла****Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, Н. О. Мерадова,  
Ю. В. Шеренковский**

*Для пластинчатого повітрянагрівача, що входить в теплоутилізаційну систему котельної установки, досліджено вплив його теплофізичних параметрів на втрату ексергетичної потужності при різних режимах роботи опалювального котла. Методика розрахунку втрат у даному повітрянагрівачі ґрунтується на використанні комплексного підходу, який поєднує ексергетичні методи з методами термодинаміки незворотних процесів. Математична модель включає диференціальне рівняння балансу ексергії та рівняння теплопровідності для повітрянагрівача при граничних умовах третього роду. Диференціальне рівняння балансу ексергії розв'язано сумісно з рівнянням теплопровідності. В результаті розв'язання отримано розрахункові залежності для визначення втрат ексергетичної потужності, пов'язаних з процесами теплопередачі.*

*Розраховано втрати ексергетичної потужності в досліджуваних теплоутилізаторах при зміні коефіцієнта теплопровідності пластини, коефіцієнта тепловіддачі з боку димових газів і режиму роботи котла. Отримані залежності від коефіцієнта теплопровідності для розглянутих режимів роботи котла мають дві чітко виражені ділянки, на першій з яких спостерігається відносно невелике збільшення втрат ексергетичної потужності при зменшенні коефіцієнта теплопровідності, на другій - втрати ексергетичної потужності в теплоутилізаторі порівняно різко зростають. Для дослідженої послідовності режимів котла перехід від його максимальної теплопродуктивності до мінімальної супроводжується зменшенням втрат ексергетичної потужності. Аналогічний характер має також залежність від коефіцієнта теплопровідності відносного вкладу втрат ексергетичної потужності в процесах теплопередачі в їх сумарні значення в теплоутилізаторі. При цьому мають місце незначні відмінності відносного вкладу даних втрат при різних режимах роботи котла. Коефіцієнт тепловіддачі з боку димових газів в межах одного режиму котла менш суттєво, ніж коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплообмінної поверхні, впливає на втрати ексергетичної потужності в процесах теплопередачі. Встановлено області зміни коефіцієнта теплопровідності та режими роботи котла, за яких втрати ексергетичної потужності в теплоутилізаторі мінімальні.*

**Ключові слова:** втрати ексергетичної потужності, теплофізичні параметри, процеси теплопередачі, режими роботи котла

## **1. Введение**

Одним из важных факторов экономии топливных и материальных ресурсов в энергетике является утилизация теплоты отходящих газов теплоэнергетических установок. Внедрение эффективных технологий утилизации теплоты позволяет существенно повысить коэффициент использования теплоты топлива данных установок. В настоящее время исследования эффективности и оптимизация теплоутилизационных систем проводятся, как правило, с использованием какого-либо одного метода анализа – эксергетического, технологического и др. Однако это не позволяет анализировать работу установок с различных позиций и при разработке ее конструкции использовать параметры, максимально приближенные к оптимальным. Создание указанных технологий должно базироваться на использовании современных комплексных подходов к анализу эффективности теплоутилизационного оборудования. Ряд исследований посвящен анализу работы энергопреобразующих систем на основе комплексных методов эксергоэкономики, методов, сочетающих эксергетический анализ с элементами теории линейных систем, многоуровневой оптимизации и др. Что касается современных теплоутилизационных систем, то данный анализ осложнен необходимостью учета большого количества конструктивных, технологических и теплотехнических параметров, ответственных за эффективность таких систем.

Предлагаемый комплексный подход к анализу эффективности теплоутилизационного оборудования на основе эксергетических методов и методов термодинамики необратимых процессов позволяет преодолеть указанные трудности. При этом зависимость характеристик эффективности данного оборудования от указанных определяющих параметров может быть получена в аналитическом виде. Ввиду изложенного, исследования, посвященные анализу эффективности теплоутилизационных систем с использованием комплексных подходов, являются весьма актуальными.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы.**

Важным инструментом исследования эффективности энергетических установок различного типа является, как известно, эксергетический анализ. Это связано, в частности, с тем, что некоторые эксергетические характеристики весьма чувствительны к изменению конструктивных и режимных параметров установок и могут быть использованы в качестве меры их термодинамической эффективности. В работе [1] отмечается, что эксергетический анализ можно рассматривать как способ получения информации, позволяющей определять области, в которых могут быть предприняты технические и другие улучшения при разработке энерготехнологий.

В качестве примера исследований, основанных на применении класса эксергетических методов, можно привести работы [2–4]. В [2] на примере установки по производству водорода из биомассы эксергетический анализ используется для оценки как ее общей, так и эксергетической эффективности. В работе [3] выполнен эксергетический анализ эффективности абсорбционной холодильной машины и определены переменные, однозначно характеризующие ее производительность. Для анализа эффективности котельной в работе [4] ис-

пользован балансовый метод эксергетического анализа, с помощью которого рассматриваются два основных вида эксергетических потерь, связанных с необратимым сжиганием топлива и теплопереносом. Однако применение данного метода к установке в целом не позволяет проанализировать эффективность каждого ее элемента, локализовать эксергетические потери и определять значения характеристик, при которых эти потери минимальны.

В работе [5] отмечается, что, несмотря на то, что эксергетический анализ является мощным инструментом для разработки, оценки и совершенствования систем преобразования энергии, отсутствие соответствующей формальной процедуры использования результатов данного анализа значительно ограничивает широту его применения. Использование для анализа эффективности указанных установок только методов эксергетического анализа без применения комплексных подходов не позволяет исследовать работу данных установок в технологическом, теплофизическом, экономическом и других аспектах, что ограничивает полноту выполняемого анализа. Примерами исследований, базирующихся на использовании комплексных подходов, могут служить работы [6–9].

На основе комплексного эксергоэкономического подхода в [6] проведена оценка работы электростанции с комбинированным циклом. Рассматриваются суммарные эксергетические потери и потери для каждого компонента системы, которые определяются физическими, технологическими и экономическими ограничениями. Анализируется уровень устраняемых эксергетических потерь, что обеспечивает реалистичную оценку потенциала для повышения термодинамической эффективности компонентов системы.

В работе [7] с применением комплексного подхода на основе сочетания метода эксергетического анализа и метода многоуровневой оптимизации получены данные об оптимальных значениях режимных и конструктивных параметров комбинированной теплоутилизационной установки с применением водо- и воздухогрейного оборудования. Использование результатов выполненных исследований при разработке конструкции установки позволило увеличить ее эффективность на 2,5 %.

Работа [8] посвящена сравнительному анализу двух комплексных методов оптимизации теплоутилизационной установки для котельных, сочетающих в первом случае эксергетический и структурно-вариантный методы, во втором – эксергетический метод и метод многоуровневой оптимизации. По результатам проведенного сопоставления показано, что эксерго-технологическая эффективность теплоутилизационной установки, оптимизированной с использованием метода многоуровневой оптимизации, на 2 % выше эффективности той же установки, оптимизированной с использованием структурно-вариантного метода.

В работе [9] изложены основные термодинамические положения комплексного подхода к анализу эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем на основе использования эксергетического и структурно-вариантного методов, адаптированные к исследованию теплоутилизационных систем сложной структуры. Применение результатов исследований позволило увеличить эффективность теплоутилизационных систем, в среднем, на 3–4 %.

Выполненный анализ литературных источников [1–5] свидетельствует о том, что в настоящий момент недостаточно внимания уделяется вопросам применения результатов эксергетических исследований в практике. Рассматриваемые в работах [6–9] комплексные подходы не позволяют дифференцировать эксергетические потери в установке и использовать результаты исследований для выявления условий, при которых уровень потерь будет минимальным. Для решения указанных проблем возможно применение комплексного подхода, сочетающего эксергетические методы с методами термодинамики необратимых процессов. Этот подход позволит разделить потери эксергетической мощности в установке по причинам и областям их локализации, выделить эксергетические потери, связанные с теплопередачей, и определить теплофизические и режимные параметры, при которых потери будут минимальными. Применение данного подхода даст возможность определить пути повышения эффективности теплоутилизационных систем котельных установок.

### **3. Цель и задачи исследования**

Цель работы – определение потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в пластинчатом воздухонагревателе на основе комплексного подхода, позволяющего разделить указанные потери по причинам и областям их локализации, а также значений теплофизических и режимных параметров, при которых эти потери будут минимальными. Это даст возможность повысить эффективность воздухонагревателя.

С применением предложенной методики получена аналитическая зависимость потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в пластине воздухонагревателя от его теплофизических параметров.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать методику расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в воздухонагревателе теплоутилизационной системы за котлом ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г) и получить зависимость этих потерь от теплофизических параметров воздухонагревателя в аналитическом виде;
- определить величины потерь эксергетической мощности при различных теплофизических параметрах воздухонагревателя и режимах работы котла и установить вклад этих потерь в процессах теплопередачи в суммарные потери эксергетической мощности;
- определить области изменения теплофизических параметров и режимов работы котла, при которых потери эксергетической мощности в процессах теплопередачи минимальны.

### **4. Методы исследования эффективности газозвоздушного утилизатора**

Исследованы закономерности изменения эффективности пластинчатого воздухонагревателя теплоутилизационной системы котельной установки на основе анализа потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи. Данные потери определялись с использованием разработанной методики, базирующейся на применении комплексного подхода, сочетающего эксергетические методы с методами термодинамики необратимых процессов.

## 5. Результаты исследования эффективности пластинчатого воздухонагревателя теплоутилизационной системы

### 5. 1. Разработка методики расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в воздухонагревателе теплоутилизационной системы за котлом ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г)

Исследуемый пластинчатый воздухогрейный теплоутилизатор (воздухонагреватель) входит в систему теплоутилизации отопительного котла ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г), предназначенную для подогрева дутьевого воздуха (рис. 1).

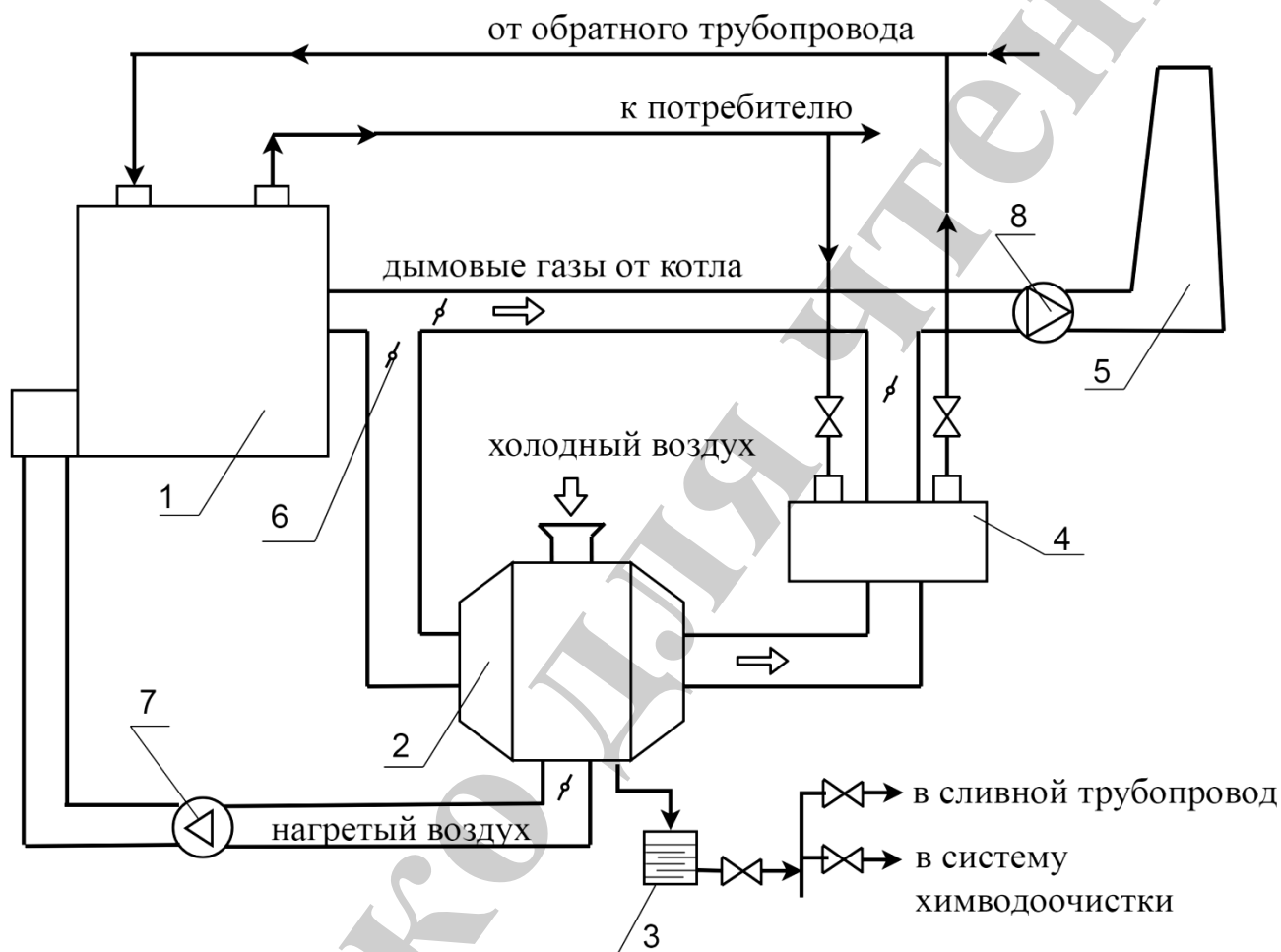


Рис. 1. Принципиальная схема котельной установки с системой теплоутилизации отходящих газов котла: 1 – отопительный котел; 2 – воздухонагреватель; 3 – конденсатосборник; 4 – газоподогреватель; 5 –дымовая труба; 6 – шибер; 7 – вентилятор; 8 – дымосос

В рассматриваемой системе теплоутилизации газоподогреватель 4 применяется с целью защиты газоотводящих трактов котла от конденсатообразования.

Для разработки методики расчета потерь эксергетической мощности в пластине воздухонагревателя использовалась математическая модель, которая включает дифференциальные уравнения баланса эксергии и уравнение теплопроводности для пластины при граничных условиях третьего рода [7–9]:

$$\rho \frac{de}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \right] + q_v \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) - \frac{T_0}{T^2} q \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1)$$

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_v, \quad (3)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 (\theta_1 - T_{x=0}), \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_2 (\theta_2 - T_{x=\delta}), \theta_2 = T_0. \quad (6)$$

В правой части формулы (1) выражение под знаком производной – поток эксергии теплоты, второе слагаемое – эксергетическая мощность внутренних источников теплоты и третье слагаемое – потери эксергетической мощности, связанные с теплопроводностью, вязкостью фаз, межфазным теплообменом, трением между фазами и др.

Здесь  $c$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$  – удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность материала пластины;  $e$  – удельная эксергия;  $q$  – плотность теплового потока;  $q_v$  – плотность внутренних источников энергии;  $T$  – температура пластины;  $T_0$  – начальная температура;  $t$  – время;  $x$  – координата;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи от стенки пластины к воздуху и дымовым газам соответственно;  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – температуры воздуха и дымовых газов;  $\delta$  – толщина пластины.

Потери эксергетической мощности для всей системы, имеющей объем  $V$ , определяются следующим образом:

$$E_{\text{пот}} = -T_0 \int_V \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x_i} dV = T_0 \lambda \int_V \frac{1}{T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)^2 dV. \quad (7)$$

В результате решения (1)–(7) получены зависимости для расчета потерь эксергетической мощности, связанных с процессами теплопередачи в пластине толщиной  $\delta$  без внутренних источников тепла, для установившегося режима при граничных условиях третьего рода:

$$E_{\text{пот}}^{\text{теп}} = \frac{T_0 \lambda F}{\delta} \left[ \frac{2K - L}{-G(K - L + R)} - \frac{L}{GR} - \frac{2K}{G\sqrt{G}} \ln \frac{(2K - L - \sqrt{G})(-L + \sqrt{G})}{(2K - L + \sqrt{G})(-L - \sqrt{G})} \right]. \quad (8)$$

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda}, \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 \delta}{\lambda}.$$

$$A = Bi_1 Bi_2; \quad B = Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 Bi_2; \quad C = Bi_1 + Bi_2;$$

$$D = Bi_1; \quad K = A/B; \quad P = (D + A)/A;$$

$$N = (C + A)/B; \quad L = PK + N; \quad M = \theta_2 B/A(\theta_1 - \theta_2);$$

$$R = M + PN; \quad G = L^2 - 4KR,$$

где  $F$  – площадь пластины; индекс верхний: теп – теплопередача; индекс нижний: пот – потери.

## 5. 2. Расчет потерь эксергетической мощности в воздухонагревателе при различных теплофизических параметрах воздухонагревателя и режимах работы котла

В соответствии с полученной расчетной формулой (8) определены потери эксергетической мощности в пластинчатом воздухонагревателе (при количестве пластин 40 и их размерах 1×1 м) в зависимости от коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , коэффициента теплоотдачи со стороны дымовых газов  $\alpha_2$  при различных режимах работы котла (рис. 2–5). Рассматривалось семь режимов работы котла в последовательности от его максимальной до минимальной нагрузки в течение отопительного периода. При этом учитывалось, что по регламенту, если тепловая нагрузка котлов составляет 50 % от номинальной, осуществляется перевод соответствующего числа котлов в номинальный режим при уменьшении общего количества работающих котлов [10]. Исходные данные для решения задачи соответствовали режимной карте рассматриваемого котла ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г) (табл. 1). Расчет общих потерь эксергетической мощности в воздухонагревателе проводился по формуле (9):

$$E_{\text{пот}}^{\text{общ}} = G_{\text{дг}} \left[ c_{\text{дг}} (T_{\text{дг}}^{\text{вх}} - T_{\text{дг}}^{\text{вых}}) - T_c \left( c_{\text{дг}} \ln \frac{T_{\text{дг}}^{\text{вх}}}{T_{\text{дг}}^{\text{вых}}} - \frac{R}{\mu_{\text{дг}}} \ln \frac{p_{\text{дг}}^{\text{вх}}}{p_{\text{дг}}^{\text{вых}}} \right) \right] -$$

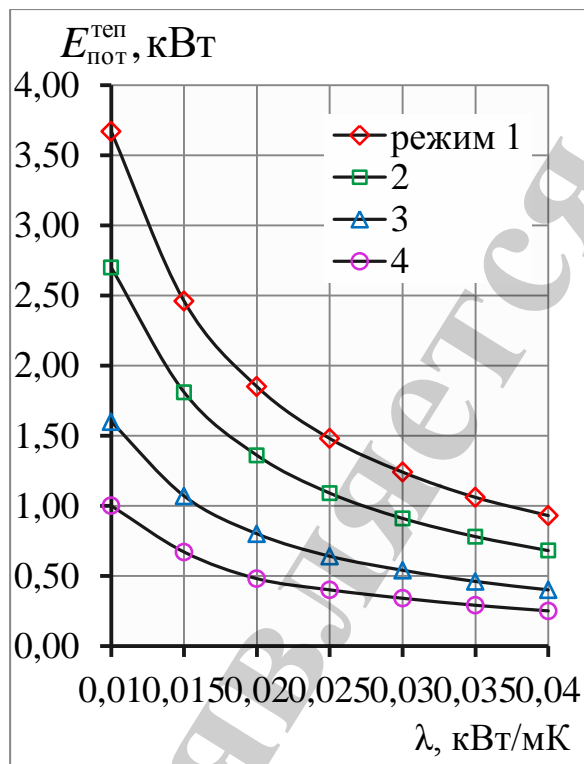
$$- G_{\text{воз}} \left[ c_{\text{воз}} (T_{\text{воз}}^{\text{вых}} - T_{\text{воз}}^{\text{вх}}) - T_c \left( c_{\text{воз}} \ln \frac{T_{\text{воз}}^{\text{вых}}}{T_{\text{воз}}^{\text{вх}}} - \frac{R}{\mu_{\text{воз}}} \ln \frac{p_{\text{воз}}^{\text{вых}}}{p_{\text{воз}}^{\text{вх}}} \right) \right], \quad (9)$$

где  $G$  – расход теплоносителей;  $p$  – давление;  $R$  – газовая постоянная;  $T_c$  – температура окружающей среды;  $\mu$  – молекулярная масса; индексы верхние: вх – вход, вых – выход; индексы нижние: дг – дымовые газы; воз – воздух.

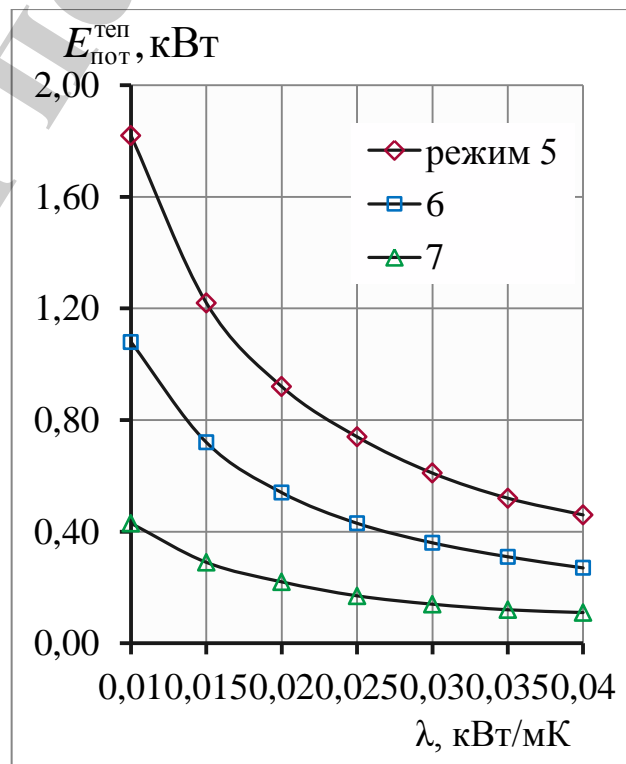
Таблица 1

Исходные данные для расчетов потерь эксергетической мощности в воздухонагревателе

Параметр	Режимы работы котла ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г)						
	1	2	3	4	5	6	7
$T_{дг}^{вх}, ^\circ\text{C}$	156,8	145,5	133,2	120,0	130,8	116,5	95,3
$T_{дг}^{вых}, ^\circ\text{C}$	83,8	77,1	71,5	64,5	76,6	69,0	57,9
$T_{воз}^{вх}, ^\circ\text{C}$	-20,0	-15,0	-10,0	-5,0	0	5,0	10,0
$T_{воз}^{вых}, ^\circ\text{C}$	66,4	65,7	62,7	60,3	63,8	60,8	55,5
$P_{дг}^{вых}, \text{кПа}$	100,45	100,56	100,67	100,77	100,44	100,60	100,79
$P_{воз}^{вых}, \text{кПа}$	99,60	99,67	99,78	99,84	99,62	99,72	99,85
$G_{дг}, \text{кг/с}$	0,91	0,81	0,70	0,60	0,91	0,78	0,57
$G_{воз}, \text{кг/с}$	0,83	0,73	0,64	0,54	0,83	0,71	0,52



а



б

Рис. 2. Зависимость от коэффициента теплопроводности  $\lambda$  пластины потерь эксергетической мощности  $E_{пот}^{теп}$  в процессах теплопередачи при различных режимах работы котла: а – режимы 1–4; б – режимы 5–7



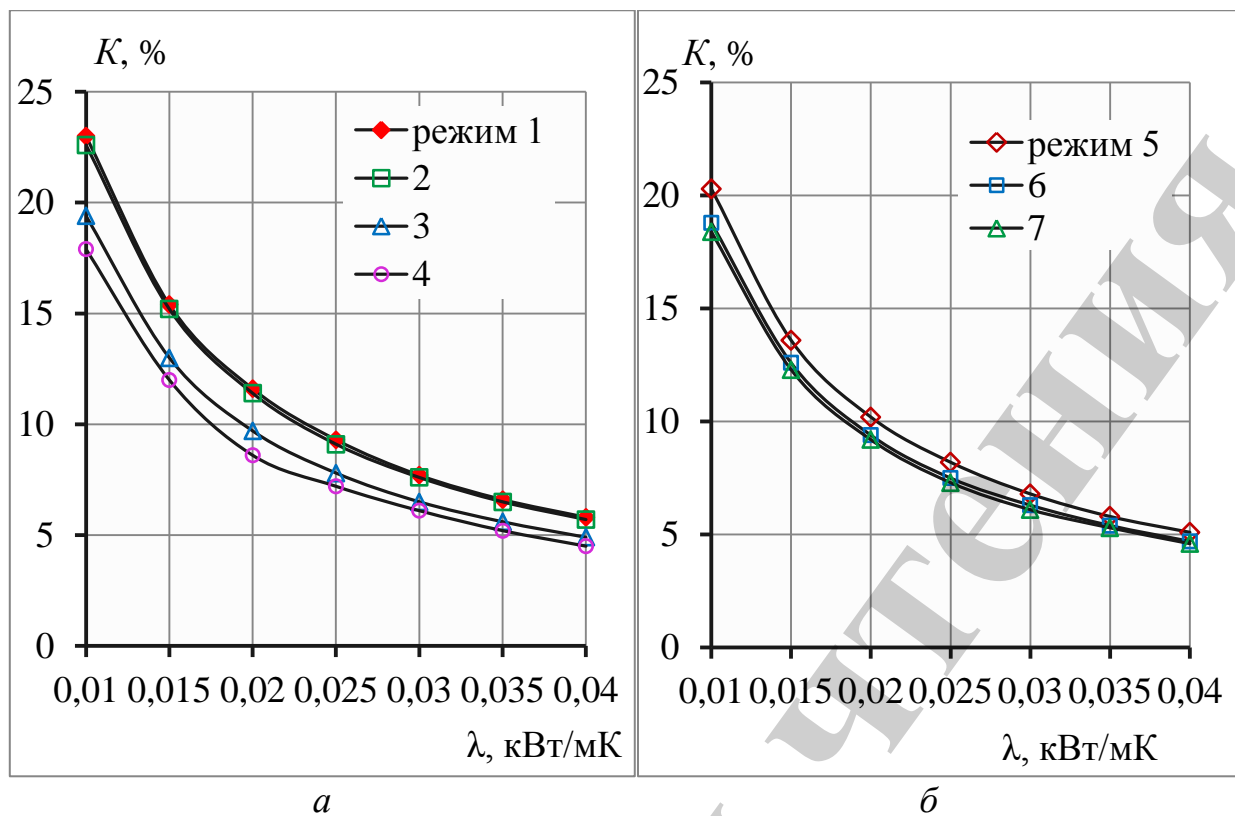


Рис. 3. Зависимость от коэффициента теплопроводности  $\lambda$  пластины относительного вклада  $K$  потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в суммарные потери эксергетической мощности в воздухонагревателе при различных режимах работы котла:  
 а – режимы 1–4; б – режимы 5–7

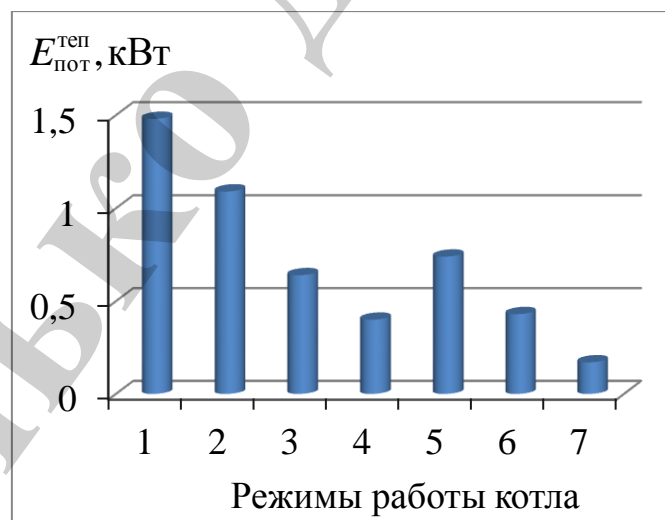


Рис. 4. Потери эксергетической мощности в процессах теплопередачи  $E_{\text{пот}}^{\text{теп}}$  в воздухонагревателе при различных режимах работы котла для  $\lambda=0,025$  кВт/мК

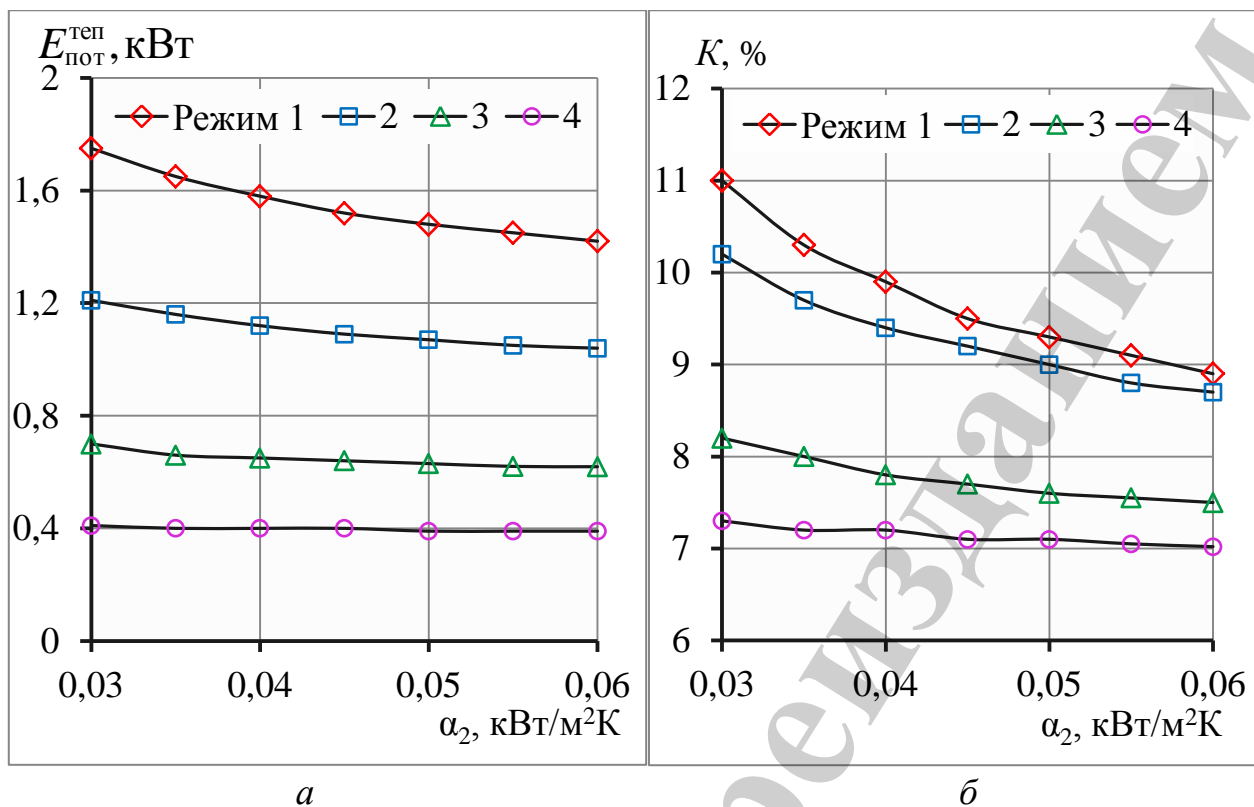


Рис. 5. Зависимость от коэффициента теплоотдачи со стороны дымовых газов  $\alpha_2$ : а – потеря эксергетической мощности  $E_{пот}^{теп}$ ; б – относительного вклада  $K$  потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в суммарные потери  $E_{пот}^{общ}$  в воздухонагревателе

### 5. 3. Определение областей изменения теплофизических параметров и режимов работы котла, при которых потери эксергетической мощности в процессах теплопередачи минимальны

Как видно из рис. 2, для исследуемого воздухонагревателя наблюдается существенная зависимость потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи от коэффициента его теплопроводности  $\lambda$  и от режимов работы котла.

На рис. 2 кривые, иллюстрирующие потери эксергетической мощности в воздухонагревателе в зависимости от коэффициента теплопроводности  $\lambda$  пластины, для всех режимов работы котла имеют два четко выраженных участка. На первом участке при изменении коэффициента  $\lambda$  от 0,04 кВт/мК до 0,025 кВт/мК происходит относительно небольшое увеличение потерь эксергетической мощности в воздухонагревателе (0,1...0,6 кВт). На втором участке при изменении коэффициента теплопроводности от 0,025 кВт/мК до 0,01 кВт/мК потери эксергетической мощности в воздухонагревателе сравнительно резко возрастают. При этом переход от первого режима к четвертому и от пятого режима к седьмому сопровождается уменьшением потерь эксергетической мощности при всех значениях  $\lambda$ . Следует отметить, что при высоких значениях коэффициента теплопроводности зависимость потерь эксергетиче-

ской мощности от режима работы котла менее выражена, чем при низких коэффициентах теплопроводности. Аналогичная картина наблюдается и для зависимости от коэффициента теплопроводности относительного вклада потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи  $K = E_{\text{пот}}^{\text{теп}} 100\% / E_{\text{пот}}^{\text{общ}}$  в суммарные потери эксергетической мощности  $E_{\text{пот}}^{\text{общ}}$  в воздухонагревателе (рис. 3). Однако в этом случае имеют место незначительные отличия относительного вклада данных потерь при различных режимах работы котла. Таким образом, исследования показали, что наименьшими потерями эксергетической мощности характеризуется область изменения коэффициента теплопроводности от 0,025 кВт/мК до 0,040 кВт/мК, а также области от третьего до седьмого режимов работы воздухонагревателя.

Необходимо отметить, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  со стороны дымовых газов оказывает сравнительно небольшое влияние на потери эксергетической мощности в процессах теплопередачи в пластине в рамках одного режима работы котла (рис. 5). При этом согласно полученным данным переход от первого режима к седьмому сопровождается несколько менее выраженным уменьшением потерь эксергетической мощности с увеличением значений  $\alpha_2$ . Зависимость относительного вклада потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в пластине в суммарные потери от этого коэффициента в целом носит такой же характер, как и от коэффициента теплопроводности.

## **6. Обсуждение результатов исследования эффективности пластинчатого воздухонагревателя**

Используемый для воздухонагревателя теплоутилизационной системы за котлом ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г) комплексный подход, в отличие от альтернативных [6–9], позволил разделить в исследуемом воздухонагревателе потери эксергетической мощности по причинам и областям их локализации и выделить потери от теплопередачи. Для исследуемого воздухонагревателя аналитическая зависимость данных потерь от теплофизических параметров, полученная в результате совместного решения дифференциального уравнения эксергии и уравнения теплопроводности, позволила установить закономерности изменения указанных потерь от коэффициента теплопроводности пластины и коэффициента теплоотдачи со стороны дымовых газов при различных режимах работы котла. Преимуществом данного подхода по сравнению с подходами, изложенными в [1–5], является возможность применения результатов исследований для повышения эффективности воздухонагревателя путем определения области изменения теплофизических и режимных параметров, при которых уровень потерь эксергетической мощности в воздухонагревателе является минимальным.

Диапазону коэффициентов теплопроводности от 0,025 кВт/мК до 0,040 кВт/мК, который соответствует наименьшим потерями эксергетической мощности в воздухонагревателе, отвечают легированные стали различного типа (хромистые, хромомолибденовые, хромоникелевые и др.). Тип и марка стали определяются при конструировании соответствующих теплообменников в зависимости от необходимости обеспечения их других характеристик (кислото-и

температуростойкости, прочности и т. д.). В настоящее время при изготовлении пакетов пластин теплоутилизаторов наряду с традиционно используемыми материалами успешно применяются полимерные микро- и нанокompозиты, обладающие широким спектром теплофизических характеристик.

Данные исследования проведены для воздухонагревателя, состоящего из пакетов пластин. Применение используемого подхода для анализа потерь эксергетической мощности в теплоутилизаторах различного типа требует рассмотрения в каждом конкретном случае определенных граничных условий для уравнения теплопроводности и получения соответствующих аналитических или численных решений путем совместного решения дифференциального уравнения эксергии и уравнения теплопроводности.

Развитие данного исследования может идти в направлении усовершенствования методики анализа эффективности теплоутилизаторов, сочетающей эксергетические методы с методами термодинамики необратимых процессов. Целесообразным является получение значений диссипаторов эксергии, позволяющих разделить потери эксергетической мощности от теплопередачи и определить гидродинамические потери при движении теплоносителей. Это даст возможность установить вклад в суммарные потери в воздухонагревателе каждого из диссипаторов эксергии и определить основные характеристики воздухонагревателя, обеспечивающие минимальный уровень потерь.

## **7. Выводы**

1. С использованием комплексного подхода, сочетающего эксергетические методы с методами термодинамики необратимых процессов, разработана методика расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в пластинчатом воздухонагревателе теплоутилизационной системы за котлом ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г). Методика позволяет, используя совместное решение дифференциального уравнения эксергии и уравнения теплопроводности, получить аналитическую зависимость потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в пластине воздухонагревателя от его теплофизических параметров.

2. На основе разработанной методики определены величины потерь эксергетической мощности в пластине воздухонагревателя и вклад этих потерь в процессах теплопередачи в соответствующие суммарные потери. Установлены зависимости данных потерь от коэффициента теплопроводности пластины и коэффициента теплоотдачи со стороны дымовых газов для различных режимов работы котла. Показано, что для всех режимов работы котла увеличение коэффициентов теплопроводности и коэффициента теплоотдачи со стороны дымовых газов приводит к уменьшению потерь эксергетической мощности, что связано со снижением термического сопротивления теплопередачи при увеличении указанных коэффициентов.

3. Определены области изменения теплофизических параметров и режимов работы котла с минимальным уровнем потерь эксергетической мощности. Показано, что наименьшие потери эксергетической мощности наблюдаются в диапазоне изменения коэффициента теплопроводности пластины от

0,025 кВт/мК до 0,040 кВт/мК и для последовательности рассматриваемых режимов работы котла от третьего до седьмого.

### Литература

1. Sahin A. Z. Importance of Exergy Analysis in Industrial Processes. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228988818>
2. Exergy analysis: An efficient tool for understanding and improving hydrogen production via the steam methane reforming process / Hajjaji N., Pons M.-N., Houas A., Renaudin V. // Energy Policy. 2012. Vol. 42. P. 392–399. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.003>
3. Cziesla F., Tsatsaronis G., Gao Z. Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in an externally fired combined cycle power plant // Energy. 2006. Vol. 31, Issue 10-11. P. 1472–1489. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.08.001>
4. Jiang Y. Y., Zhou S. X. Exergy Analysis of Boiler Based on the Temperature Gradient // 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2010. doi: <https://doi.org/10.1109/appeec.2010.5449523>
5. Tsatsaronis G., Morosuk T. Advanced thermodynamic (exergetic) analysis // Journal of Physics: Conference Series. 2012. Vol. 395. P. 012160. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/395/1/012160>
6. Morosuk T., Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines // Energy. 2008. Vol. 33, Issue 6. P. 890–907. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.09.012>
7. Анализ эффективности теплоутилизационной установки для нагревания и увлажнения дутьевого воздуха котлоагрегата / Фиалко Н. М., Степанова А. И., Пресич Г. А., Гнедаш Г. А. // Промышленная теплотехника. 2015. Т. 37, № 4. С. 71–79. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/142191/08-Fialko.pdf?sequence=1>
8. Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами / Фиалко Н. М., Степанова А. И., Навродская Р. А., Шеренковский Ю. В. // Промышленная теплотехника. 2014. Т. 36, № 1. С. 41–46.
9. Термодинамическая оптимизация и анализ эффективности теплоутилизационных систем котельных агрегатов / Фиалко Н. М., Степанова А. И., Пресич Г. А., Навродская Р. А., Шеренковский Ю. В., Малецкая О. Е., Гнедаш Г. А. // Промышленная теплотехника. 2012. Т. 34, № 2. С. 59–66. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/59078/09-FialkoNEW.pdf?sequence=1>
10. Кузнецов Н. В., Митор В. В., Дубовский И. Е. Тепловой расчет котельных агрегатов. Киев: Издательство Эколит, 2011. 296 с.